

ÉRTEKEZÉSEK EMLÉKEZÉSEK

HALÁSZ OTTÓ

TARTÓSZERKEZETEK
MÉRETEZÉSE.
MODELL ÉS VALÓSÁG



58

AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST



ÉRTEKEZÉSEK
EMLÉKEZÉSEK

ÉRTEKEZÉSEK EMLÉKEZÉSEK

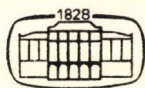
SZERKESZTI
TOLNAI MÁRTON

HALÁSZ OTTÓ

**TARTÓSZERKEZETEK
MÉRETEZÉSE.
MODELL ÉS VALÓSÁG**

AKADÉMIAI SZÉKFOGLALÓ

1983. FEBRUÁR 23.



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

A kiadványsorozatban a Magyar Tudományos Akadémia 1982.
évi CXLII. Közgyűlése időpontjától megválasztott rendes és
levelező tagok székfoglalói — önálló kötetben — látnak
napvilágot.

A sorozat indításáról az Akadémia főtitkárának 22/1/1982.
számú állásfoglalása rendelkezett.

ISBN 963 05 4500 4

© Akadémiai Kiadó, Budapest 1987 — Halász Ottó

Printed in Hungary

Több, mint száz évvel ezelőtt, 1868 januárjában építés közben beomlott a pest-lipótvárosi főtemplom – ma Bazilika néven ismerjük –, szóval e templom kupolája. Mivel a katasztrófát bizonyos jelenségek előre jelezték, emberélet áldozatul nem esett.

Ennek a – különben sajnos nem egyedülálló – eseménynek bizonyos *hazai tudománytörténeti* jelentősége van. Az építés folytatásával megbízott Ybl Miklós tanulmányt tett közzé, és a szerencsétlenséget főleg gondatlan anyagmegválasztásnak és falazásnak tulajdonította. Vitairatában Kherndl Antal – a Műegyetem első hidászprofesszora, később a világhírű régi Erzsébet-híd tervezésének elméleti megalapozója és ennek az Akadémiának is tagja – más okot jelölt meg: előzetes statikai számítás hiánya miatt előállott tervezési hibát mutatott ki. Erdemes szavait felidézni:

„...én feltétlenül megvagyok győződve arról – írja 1868-ban –, hogy csekély számú évek után a lipótvárosi templom mérete nagyságában csak távolról megközelítő építmény tervének kivitele sem fog megkezdetni, mielőtt a terv egyensúlyi viszonyai tüzetes tárgyalás alá nem vétetnek” – és egy frissen megjelent külföldi statikai szakmunkára hivatkozva kijelenti: „hol e munka ösmeretes, alig terveztetik még építmény egyedül szemmérték alapján”.

Végül ezt saját szakmája példájával támasztja alá:

„...kinek jutna ma eszébe egy nagyobb vas-híd megtervezése anélkül, hogy méreteit tüzetesen kiszámítaná? És mégis ezelőtt tizenöt évvel az idevágó elméleti tanulmányok az építéssel foglalkozó technikusok nagy része által csak a legnagyobb közönyösséggel fogadtattak. Azóta a hídtartók elmélete kifejlődött, a régi szerkezetek abban hagytak, újak jöttek használatba, melyek az *elmélet követelményeinek* szorosan megfelelnek és jelenleg mindenki el fogja ismerni, hogy hídépítés azon mérvben, amint azt a vonatok szükségessé teszi, jóformán csak azóta létezik, mióta az *elméletileg* kifejlődött.”

Úgy látszik tehát, hogy szerencsésen éppen annak az időszaknak válhattunk tanúivá, amikor is — külföldi példák nyomán hazánkban is — a teherhordó szerkezetek építésének ősi mestersége (vagy ha úgy tetszik, művészete) és a fejlődő természettudományok között jól képzett mérnökök — hadd említsem Coulomb és Navier nevét — munkája nyomán létrejött az a híd, az a kapocs, amelyet legyen szabad tartószerkezetek elméletének nevezni.

Az elmélet iránti korábbi közönyösség — amire Kherndl Antal is célzott — nyilván az építés igen hosszú múltjával kapcsolatos, mely elmélet nélkül is óriási alkotásokat produkált. A középkor kutatói például váltig állítják,

hogy a gótika csodálatos teherhordó szerkezeteinek létrehozása során — noha az egyensúlyozás néhány megállapítása Arisztotelész kora óta ismeretes és Arkhimédész általuk már a világot is kimozdíthatónak vélte — szóval a középkorban a tervezéshez szükséges elemi tételeket — például az erő felbontásának tételeit — sem fogalmazták meg tudatosan, és a gótikus katedrálisok — az egyensúlyozás e remekei — közvetlen tapasztalatok, évszázados próbálkozások, a méretek fokozatos növelése, megálló és bedőlt szerkezetek összehasonlításának termékei. A méretek elérhető határát a már kényszerűségből befejezetlen Beauvais-i katedrális hirdeti: és mire a szabályok megfogalmazódtak — a gótika kora is lejárt.

És nem is kell ilyen messzire menni. Majdnem az idézett vita évében kezdődött meg az amerikai hídépítés első nagy csúcsteljesítményének, a közel 500 m nyílású Brooklyn-hídnak az építése, melynek tervezése — technológia-történészek szerint — legalább hatvan kisebb-nagyobb európai és amerikai függőhíd katasztrófáinak tanulságán alapult.

Ezzel szemben Kherndl szavaiban — és az őt követő szerkezetépítő generációk gondolkodásában — az elmélet iránti igen nagy *várakozás* tükröződik — *igen érthetően*.

Az építési igények a gyakorlati tapasztalatok visszacsatolásának és általánosításának lényeges gyorsítását követelték meg; annak ellenére, hogy a nagy teherhordó szerkezetek (al-

kotó elemeik tömegtermék jellege mellett is) egészükben egyedi jellegűek maradtak — a budapestiek nehezen tudnák elviselni, ha egyforma hidakon kellene a Dunán átkelniük —, és így az ipari termékek kifejlesztésének olyan módszerei, mint a prototípusok és null-szériák fokozatos kipróbálása és javítása — igen korlátozottan alkalmazhatók.

Mindezt tetézi a társadalom bizonyos szigorra a szerkezetek tervezői és építői felé. Hadd idézzek egy még régebbi dokumentumot: Hammurabbi 4000 évnél régebbi törvénykönyvében vésték kőbe:

„Ha egy építőmester házat épít egy másik embernek és annak szerkezetét nem készíti elég erőre, és a ház összedől és tulajdonosának halálát okozza, lakoljon életével az építő is.”

Azóta ez az álláspont sokat finomodott, de a társadalom az építési katasztrófáktól ma is óvni kívánja magát és Kherndl jövődőlésével összhangban megköveteli, hogy *az építést megelőzően* — számítással vagy más módon — a tervező a hatóság előtt a leendő szerkezet kellő biztonságát igazolja. Ez pedig csak *megbízható elmélet birtokában* képzelhető el.

Kétségtelen, hogy az elméleti eredmények fokozódó felhasználása — az általános technikai fejlődés keretein belül — jelentősen járult hozzá a szerkezetépítés nagy teljesítményeihez: a másfél kilométeres hídnyílások, 300—

400 méteres felhőkarcolók, 600–700 méteres toronymagasságok eléréséhez.

Mégis nagyon indokolt az elmélet megbízhatóságát és korlátait szemügyre venni és taglalni: *mennyire* szorította ki az elmélet szintjére emelt tapasztalat a közvetlen tapasztalásra épülő „szakmai hagyományt”.

Ez nem utolsósorban a számítógépek már most is igen jelentős, de várhatóan szélesebben és újfajta módon történő alkalmazásával függ össze. Már Kherndl idézett munkájában szerepel és azóta is él az a nézet, hogy a gazdagnak ítélt természettudományos háttér gyakorlati alkalmazásának szegényessége számítástechnikai okokra vezethető vissza.

„...hogyan ez (tudniillik a statikai számítás készítése) mostanáig nem történt — írja Kherndl —, annak *oka csupán az*, hogy eddig nem léteztek e célra elég könnyen kezelhető modorok”.

Ezért dolgozták ki a múlt században a grafosztatika meglepően hatékony szerkesztési módszereit, melyeket később a kézi számítógépre komponált eljárások felváltottak ugyan, de döntő változást csak a korszerű számítógép hozott numerikus módszerekkel, szimulációs lehetőségekkel és a teljes művelet automatizálásának perspektívájával. Az ember és gép együttműködésének reális továbbvitelében azonban célszerű tisztázni: *mit is tud az egyik*

és a másik partner – és most legyen az ember-ről szó.

Ha a kérdést *általánosságban* vizsgáljuk – a sok kedvező tényező között –, néhány, az elmélet korlátaira utaló bizonytalanságra kell rámutatni. Legfontosabb ezek közül, hogy az építési vagy szerkezeti megoldásban bekövetkező jelentős fordulatok nemcsak a múlt században, hanem a közelmúltban sem kerülhettek el a valóságos szerkezetek katasztrófái árán szerzett ismereteket.

Három példát említek erre:

Az egyik közismert: 1940-ben az USA-ban rekordfelállítási kísérlet történt. Sok nagy függőhíd megépítése után – melyekkel a megelőző 50 évben lényeges probléma nem merült fel – olyan áthidalást terveztek, mely a merevítőgerenda karcsúságában és eleganciájában lényegesen felülmúlja elődeit: a Brooklyn-i, Washington és Golden Gate hidat. Így került sor a híressé-hírhedtté vált Tacoma híd építésére, mely rövid néhány hónap után viszonylag gyenge szélben lengésbe jött és 2 órás agónia után leszakadt.

Nem tervezői *elnézésről* volt szó: az aerodinamikai ismeretek már elég fejlettek voltak, 200 kilométeres orkánra méretezték a hidat, és a tervezőt a kontinens kiváló tudósai segítették elméleti és szélcsatorna vizsgálatokkal. Az elméleti ismeretek határait kellett újraértékelni.

Egy másik példa körülbelül ugyanebből az időből: ekkor kezdődik az acélszerkezetek — köztük hidak — építésének legjelentősebb technológiai fordulata: a hegesztés alkalmazása. (Jelentősége csak a II. világháború után fog igazán megmutatkozni: az új technológia alapján újjátervezett lerombolt hidak elődeiknél lényegesen könnyebbek voltak.) A hegesztés bevezetése sajnos ismét katasztrófákon át vezetett.

Az első adat 1938-ból: Belgiumban egy 75 méteres hegesztett híd leszakadása, melyet sajnos több más követett. A legsúlyosabbat 1963-ban jegyezték fel: Ausztráliában egy 700 méteres közúti felüljáró omlott össze ma már jól ismert okból: a hegesztéssel járó belső feszültségek és rideg törés miatt, mely veszély elhárításával az azóta kialakult új diszciplína, a törésmechanika mindmáig erősen küszködik.

Végül egy harmadik példa a közelmúltból: ez már a számítógépek korszaka. Az elmélet *korai* szakaszában a még bontakozó ismeretek a tervezőt a könnyen számítható, hierarchikus felépítésű szerkezetek felé orientálták, melyek elemei jól elkülöníthető feladatot láttak el. Ez könnyű elemzést biztosított — nyilván a gazdaságosság kárára.

Az elméleti, technológiai és számítástechnikai fejlődés gazdaságosabb, integrált megoldásokat hozott. Egyik típusuk a szekrényszelvényű híd, melyben alsó és magasabbrendű elemek egybeolvadnak és közös funkciót látnak

el; természetesen számításuk bonyolult. A 60-as évekre váltak divatossá — és e fejlődés sem volt mentes a katasztrófáktól.

1969-ben Bécsben rongálódott meg átadás előtt egy 210 méteres Duna-híd; 1970-ben három súlyos katasztrófáról jött hír: Walesben leszakadt egy 213 méteres szekrényhíd, Ausztráliában egy épülő híd 112 méteres nyílása; Kaliforniában egy ugyanilyen nyílású és megoldású közúti áthidalás; végül 1971-ben a 235 méteres koblenzi Rajna-híd. Ötvennél több ember halt meg, de sejtünk még más eseteket is. A nem várt ragály a szakmát erősen megrázta: Angliában hasonló hidak építését felfüggesztették, másokat ideiglenesen lezártak és a királynő egy Merrisson nevű fizikussal az élen vizsgálóbizottságot küldött ki. Érdekes jelentésükre még visszatérek. A tanulságok feltárása még ma is tart. (Hazánkban most tervezik az első nagyobb ilyen hidat.)

Hadd szúrjam itt közbe, hogy a szakmára természetesen nem a szerkezetek összedőlése jellemző, de ha ismereteink határait boncolgatjuk, ezek szolgálnak tanulsággal.

Még két gyanús tünetet említek.

Napjainkban intenzíven folyik nemzetközi tervezési szabályzatok kidolgozása; ezek során pedig sokszor konstatálható: ugyanazokból a tudományos alapokból mennyire eltérő gyakorlati következtetések születnek.

Végül manapság gyakran fordul elő, hogy sok évtizedes nagy építmények — ilyen volt a

Nyugati pályaudvar acélszerkezete, a Margit-híd parti nyílása, vagy jelenleg a lakihegyi adótorony – lebontásáról vagy megtartásáról kell dönten, melyek önmagukban – ritka alkalom – hosszú idejű, teljes léptékű kísérleteknek tekinthetők. Ezek tervezésének és működésének jelenlegi ismereteink fényében való értékelése ez utóbbiak mélysége tekintetében sok kritikára adott alkalmat.

*

Tegyünk kísérletet arra, hogy az elmélet gyenge pontjaira – és ezzel együtt a kutatás teendőire – részleteiben is rámutassunk. Legyen szabad ezúttal csak fém-, főleg acélszerkezetekre gondolni.

Kiinduló információnk az anyag – esetünkben rugalmas és képlékeny szilárd test – viselkedésének leírása és *anyagmodellbe* foglalása, oly módon, ahogyan azt a kontinuum-mechanika megköveteli. Ez utóbbi lehetőséget nyújt arra, hogy a szilárd test felületén támadó erők hatására a test belsejében lejátszódó folyamatokra következtessünk.

Tulajdonképpen innen ágazik el a tartószerkezetek elmélete, mint szaktudomány. A kontinuum-mechanika általános tételeit és megoldási módszereit egy térbeli alakzaton fogalmazza meg: mégis a szerkezetek alakjának nagyfokú bonyolultsága az elemzés ilyen útját járhatatlanná teszi. Ezért egyrészt a szerkezet

geometriai leegyszerűsítésével annak *számítási modelljét* állítjuk elő, majd az arra ható terhek és környezeti hatások számbavételével a *terhelés történetét* foglaljuk össze, mondjuk egy *teherterben* leírt trajektória segítségével. Ez most már lehetővé teszi a szerkezet mindenkori állapotát leíró paraméterek (elmozdulás, igénybevétel) – nevezzük őket primér állapotjelzőknek – számítását, illetve a terhelés során beálló változásuk trajektória formájában való szemlélését. Az állapotjelzők – vagy függvényeik – közül kiválasztjuk azokat, melyek alapján dönteni tudunk, megfelel-e vagy mindig felel meg a szerkezet a követelményeknek: ezek az ún. minőségjellemzők. A kvantitatív döntésekhez a minőségjellemzők trajektóriáját egy olyan határfelülettel hozzuk metszésbe, mely éppen a követelmények számszerűsítése útján adódik. (Mivel általában valószínűségi változókkal dolgozunk, a metszés kockázatát vizsgáljuk.)

A továbbiakban példaképpen csak egyetlen követelményről – a teherbírásról – beszélve, a határfelület definiálásához a teherbírási kimerülésének okait legalább általános kategóriákban *tapasztalatból* kell ismernünk, például úgy, hogy

- a teherbírási kimerül, ha az anyagi folytonosság megszakad; vagy

- nyugalmi állapot már nem jöhet létre *a)* nagy geometriai változások, *b)* nagy képlékeny zónák, *c)* vagy ezek együttes hatására.

Ezek alapján szerkeszthető meg az említett határfelület.

A szerkezetek elméletének kulcskérdése a számítási modell megválasztása, mely a szerkezet végtelen bonyolultságát megszüri s csak az előbb említett döntéshez szükséges tulajdonságokat tükrözi.

A modell helyességét végül a gyakorlat dönti el. Mint már hangsúlyoztuk, a teljes, rendszerint egyedi jellegű építmény kísérleti ellenőrzése problematikus. Gyakori ugyan a próbateljesítés, ez azonban általában csak a szerkezet üzemszerű, normális viselkedését tükrözi; és ilyenkor rendszerint a számítás és valóság *jó egyezését konstatáljuk*. Igazi megnyugvással azonban csak a *rendkívüli körülmények* közötti viselkedésre — a teherbírás határára — vonatkozó információk szolgálnának: erre a próbateljesítésből szerencsés esetben választ nem kapunk.

Hogy tehát a gyakorlati kontroll ne katasztrófa formájában valósuljon meg, igyekszünk minél gazdagabb tartalmú számítási modellhez folyamodni, amint azt a szakma szabályait kodifikáló előírások — mint látni fogjuk, kissé utópisztikusan — elő is írják: „... a modell a szerkezet viselkedését a valóságnál kedvezőbbnek nem tüntetheti fel”.

Ennek azonban számos akadálya van.

a) Elsőként a szerkezet geometriájának elkerülhetetlen leegyszerűsítését említem, amire az előbb már utaltam. A tudományágat meg-

alapozó elődeink legtermékenyebb ötlete a háromméretű alakzatnak egy- vagy kétméretűvé (vonallá vagy felületté) való redukálása volt; ami persze a szabadságfokot lényegesen csökkenti.

Egy *vonallá* zsugorított tartó elemei csak nyúlni, görbülni vagy csavarodni tudnak. A tartó valóságos eleme lényegesen mozgékonyabb: a keresztmetszet alakját változtathatja, a vékony falak horpadnak, a kapcsolatok deformálódnak.

A szükséges gyakorlati kompromisszum mármost rendszerint abból áll, hogy az elemzést *több modell segítségével* hajtjuk végre. A legegyszerűbb (pl. vonalas) modellel a primér állapotjellemzőket számítjuk; a minőségjellemzőket pedig egy *közbeiktatott* — nevezzük így — *részletkiemelő* modellel határozzuk meg, amely az elem magasabb szabadságfokát újra visszaadja. Ez — a gyakorlatban általánosan, de gyakran nem tudatosan alkalmazott — eljárás konfliktus-forrás lehet, mert a *részletkiemelő* modellel nyert információt a primér állapotjellemzők számításában nem, vagy csak nehezen lehet visszacsatolni. A hiba ott nagy, ahol a két modell finomsága erősen eltér. Erre tipikus példa a korábban is említett szekrény-szelvény esete és a kapcsolatos hídkatasztrófák sorában a mulasztás is kimutatható.

A visszacsatolás teljes mértékben elvileg nem is sikerülhet, hiszen ez elviselhetetlenül bonyolult primér modellt eredményezne; kü-

lönösen, mert a *kiemelő modellel* leírt részlet viselkedése általában csak numerikus úton (sőt komplikált esetben csak kísérletileg) dokumentálható, és ez a teljes szerkezet finomított modelljében racionálisan nem használható fel, csak valamilyen közelítő megformulázás közbeiktatásával. A pontatlanság mértéke ezután csak a teljes szerkezeten végzett törőkísérlettel mutatható ki.

Néhány illusztráció tanszékünk kutató kollektívájának idevágó kísérleteiből:

Az alumínium ív igénybevételei nyilván egy vonalas modellel könnyen leírhatók. A nyomás miatt az ívet alkotó lemezek bonyolultan viselkednek; állapotuk a szerkezetből kiemelve is csak vagy nagyon körülményes numerikus elemzés, vagy közvetlen kísérlet útján írható le. Az eredmények csak durván leegyszerűsítve vehetők figyelembe az ív pontosabb vizsgálatánál, és ennek jóságára a szerkezet törőkísérlete adhat csak igazolást.

Egy másik példa a rendszerint ugyancsak egydimenziós vonalas primér modellel számított gerendatartót mutat be, melynek teherbírása végül is a gerinclemez horpadása formájában merül ki: így a minőségjellemzők — ez esetben a gerinclemez deformációi és feszültségei — csak (legalább) kétdimenziós, részlet-kiemelő modellen tanulmányozhatók. A jelenség sokszor olyan összetett, hogy csak közvetlen kísérleti jellemzés adható. Statikailag határozott tartónál e kettősség nem vezet

konfliktusra: a kétfajta modell egymástól függetlenül alkalmazható; *határozatlan* szerkezet esetében már kölcsönhatásban vannak, és az előbb említett probléma itt is felmerül.

Mindennapi jelenség a tipikus acélszerkezeti keresztmetszetű (I szelvényű) keret lokális viselkedése: az övek és gerinc együttes horpadása. A jelenség ismét csak részletkiemelő számítási – vagy kísérleti – modellel írható le, melyet esetenként háromdimenziósnek kell választani. A probléma itt ismét a bonyolult viselkedésű és bonyolultan vizsgálható részlet olyan közelítő jellemzése, mellyel a keret igénybevételei – elfogadható apparátussal – számíthatók. A terhek valósághű átadása, a tényleges működés körülményeinek imitálása igen nagy ráfordítást igényel és csak speciális esetben hajtható végre. Ez előtérbe helyezte a kísérletek számítógépes szimulálását – ilyen próbálkozások tanszékünkön is folyamatban vannak – persze nem a valóságos kísérletek kiszorítása, de a tanulságok megsokszorozása céljából.

E tekintetben a kísérletezés szerepéről az alábbi gondolatokat érdemes végigkísérni:

Példaképpen gondoljunk a szerkezettervezés örökzöld témájára: a nyomott rúd kihajlására. A jelenség is, a vizsgálat matematikai apparátusa is régóta ismeretes (ez utóbbi Euler XVIII. századi munkájához kapcsolódik); mégis gyakorlati esetek megoldására alkalmas módszere a múlt század végének és e század

elejének terméke és leginkább Kármán Tódor elméleti és kísérletezői tevékenységéhez fűződik. Boncolgatása különösen azért érdekes, mert világhírűvé vált munkássága az őt követő kutató generációk számára példaképül szolgált: nagy vonzereje abban állott, hogy e téren először sikerült egy *elméletileg kifogástalan* – vagy annak vélt – megalkuvás és korrekciós tényezők nélküli elemzés és laboratóriumi kísérletek széles körű és kitűnő egyezését bemutatni. Ez a vizsgált területen utat nyitott a korábbi igen magas biztonsági tényezők jelentős csökkentéséhez.

Csakhoggy e kutatási módszernek fogyatékosságai is voltak. A laboratóriumi kísérleteket Kármán a természettudományos kutatás normáinak megfelelően úgy tervezte meg, hogy a zavaró hatások szóhoz ne jussanak, a jelenségek lényege domborodjék ki, és ezért viszonylag kisméretű, néhány deciméteres próbatestjeinek alakját, a rúdvégek megtámasztási módját, s a kísérlet egyéb körülményeit az elmélet feltevéseivel maximális összhangban alakította ki. E törekvés túlhajtására jellemző, hogy egy precíz német tanítványa a 30-as években büszkén jelenti: Kármán módszerét továbbfejlesztendő, vizsgálatait egy olyan mély pincében végezte, ahol a közlekedés keltette rezgések sem zavarhatnak.

Csúcsteljesítmény e téren talán az ugyancsak magyar Hoff kísérleti technikája – aki igazolni akarván, hogy a gömb és hengerhéra

levezetett (gyakorlatban csak 6–8-szoros biztonsági tényezővel alkalmazható) elméleti képletek *tökéletes* felületek esetére helytállóak, és ezért galvanikus úton előállított, ultraprecíz, aranyfüsthöz hasonlítható modellekkel kísérletezett.

Csakhogy az építési szerkezetek nagyok, gyártásuk és szerelésük durva módszerei olyan helyzetet teremtenek, melyek a tiszta elméleti feltevésektől messze esnek, és amelyeket kis-méretű modell tükrözni sem tud. Ezek hatása – ma már világosan látható – igen nagy lehet. Ezt fokozza az építmény alakjának megválasztásában követett stratégia: a fő, primér teher kijelölése és ennek leggazdaságosabb hordására alkalmas megoldás kikeresése. Az így – akár „mérnöki érzék”, akár tudatos optimalizálás útján – kiválasztott *alak* rendszerint a lényegtelennek ítélt hatásokra érzékeny. Például a többszörösen szimmetrikus teherre tervezett többszörösen szimmetrikus megoldást kicsiny aszimmetria nagyon megzavarja, amiért például a gömb és hengerhéjak esetében az elmélet a gyakorlati törőerőt 6–8-szorosan túlbecsülheti. Ezért a kísérleti kutatás más irányba fordult. A század közepétől a nemzetközi összefogással végzett kísérletsorozatoknál a kutatóknak nem a kísérleti darab pontosságában, hanem azok pontatlanságában – valószerűségében – kellett megegyezniük, ami már igen nagyméretű próbatesteket kívánt meg.

A geometriai pontatlanságok még úgy-ahogy kezelhetőnek bizonyultak; egyrészt könnyű mérhetőségüknél fogva, másrészt mert figyelembevételükre — a katasztrófaelmélet keretében — kitűnő matematikai apparátus alakult ki.

A helyzet akkor bonyolódott, amikor a kísérletek újabb, hasonló jelentőségű zavaró tényezőket mutattak ki: ezek közül — fémszerkezeteknél — a hengerlésből és hegesztésből eredő belső feszültségek bizonyultak legfájdalmasabbaknak, elsősorban nehéz mérhetőségük miatt.

Mindezek az elmélet és kísérlet, számítás és gyakorlat viszonyában új kérdéseket vetettek fel. Az egyik megközelítés a korábban a híd-katasztrófák során említett Merrison-jelentés szellemével jellemezhető, mely olyan követelményeket támasztott volna, hogy nagyobb szerkezeteknél — gyártás és szerelés közben — *mérni kell* a zavaró tényezők nagyságát és a számítást ezek befogadására is alkalmassá kell tenni, ily módon határozva meg a várható teherbírást.

Ez annyit jelentett volna, hogy a tervező, aki hagyományosan számításával a szerelés állapotában, üzem közben és rendkívüli körülmények között ellenőrizte szerkezetét, most egy korábbi fázist: a gyártás folyamatát is kapcsolja be számításába. Ez a kívánság — mely szinte a Kármán-féle megközelítés ellenképének tekinthető — a mérések nagy száma, bo-

nyolultsága miatt, és gazdasági okokból sem volt teljesíthető, és hamarosan le is került a napirendről.

A másik – hasonlóan nagyigényű – megközelítést tömegesen gyártott egyszerű szerkezeti elemeknél próbálták ki. Ez egyik oldalon a zavaró tényezők nagyságának és eloszlásának, másik oldalon nagyszámú törőkísérlet eredményeinek statisztikai feldolgozását követeli meg: közöttük a számítási modell és a *valószínűségelmélet* segítségével lehet kapcsolatot teremteni, így ellenőrizve a számítási modell jóságát. A vizsgálatot egyrészt a zavaró tényezők nagy száma, másrészt a szükséges méretű kísérleti populáció biztosítása nehezíti. Néhány – nemzetközi együttműködéssel készült – vizsgálat azzal a tanulsággal szolgált, hogy a nagy apparátus ellenére sem lehet olyan egyezést elérni, mint Kármán klasszikus, steril kísérleteiben (20%-nál jobb egyezés ritkán volt kimutatható, de bonyolultabb esetben – pl. kifordulásnál – ennél lényegesen rosszabb a helyzet), azt a gyanút keltve, hogy a zavaró tényezők között ismeretlen korrelációk vagy még mindig felderítetlen zavaró tényezők léteznek.

Ha a szerkezeti elemről egész szerkezetre kívánunk e gondolatmenet szerint áttérni, a feladat összetettsége hatványozódik. A valószínűségelméleti összefüggések – főleg erősen nem-lineáris kapcsolatok esetén – hosszas nu-

merikus vizsgálatokat követelnek, az azonban még nem leküzdhetetlen akadály.

A szerkezet elemekből való nem képletes, hanem valóságos összeállítása a zavaró tényezők új sorát nyitja meg: egyrészt például a szerelési kényszerből származó igénybevételekét, melyek – mint elvileg is, kísérletileg is igazolható – adott esetben a teherbírást észrevehetően befolyásolják. Másrészt sajnos a belső feszültségek laboratóriumi körülmények között mért értékeiből teljes léptékű szerkezeteken észlelt értékekre nehéz következtetni. Ezt egy híd különböző életfázisaiban végzett mérések igazolják.

Úgy látszik tehát – és ez a bemutatott példák egyik tanulsága –, hogy számítási modelljeink kiválóan tükrözik a szerkezetek viselkedését *kihasználtságuk alacsony fokán* – mondjuk így, normális üzemben –, amikor a deformációk és elmozdulások a geometria kezdeti hibáinak hatását felnagyítják, a belső feszültségek kölcsönhatásba lépnek a kialakuló képlékeny zónákkal, a számítás nem tud a jelenséghez olyan közel férkőzni, hogy a modell és valóság megfeleltetésében egy adott határt túllépjünk.

E tapasztalat a szakmát annak végiggondolására indította, hogy az elemzés klasszikus útját, mely a szerkezetet elemi összetevőkre bontja, a feszültség (egyébként ismét modellnek számító) fogalmából indul ki, és így építi fel a szerkezet viselkedésének modelljét, szó-

val, hogy ezt az utat, mely kis mozgások és alacsony feszültségek állapotában igen eredményesnek bizonyult, a teherbírás *vizsgálata során nem kellene-e, hogy úgy mondjam, rövidre zárni.*

Ez bizonyos tekintetben a szerkezeti tudomány kezdeti szakaszában, a XVIII. század végén, pl. Coulomb gondolatvilágában szereplő — és az elmélet kidolgozatlanágából eredő — módszerekre emlékeztet, melyek — a leszakadó földtömegek vagy beomló kő boltívek vizuális élményeire támaszkodva — bontották a vizsgált objektumot *részeire*, kutatva, milyen határig maradhatnak ezek egyensúlyban.

Az *interpolációs* eljárások, melyek a szerkezet viselkedésének két végletes esetéből indulnak ki, közöttük viselkedéstípusokat állítanak fel: a besorolás kísérleti úton (ezek híján numerikus vizsgálatokkal) történhet. Ez akkor eredményes, ha a végletes viselkedést leíró modellek zavaró tényezőkre nem érzékenyek. A szerkezet anyagának ún. ideálisan rugalmasképlékeny modellje a két alaptulajdonságot: a rugalmassági modulussal leírható *merevséget* és a folyási határral megadható *szilárdságot* tükrözi. Ezek kettéválaszthatók egy korlátlanul szilárd, de adott merevségű és egy végtelen merev, de adott szilárdságú anyagmodellre, amelyekre felépített végletes szerkezeti viselkedés — bizonyos esetben — a teherbírás olyan határait adja, melyeket külön-külön elvileg

sem a geometriai hibák, sem a belső feszültségek nem befolyásolnak. Ezek közül F_y éppen a Coulomb-féle teherbírás modernizált változata.

Az interpolációval adódó viselkedési típusokat grafikusan jellemzett interpolációs görbék képviselik. Valóságos vagy szimulált kísérletek, numerikus vizsgálatok szolgálják ezek megformulázását, illetve a besoroló paraméterek megválasztását. Az eredmény néha meglepően hatásos: az ilyen elvekre épülő, keretekre vonatkozó ún. Rankine–Merchant-formula legprimitívebb alakjában is olyan eredményeket produkál, melyek a sokkal rafináltabb eljárásokkal is konkurálnak.

Ellentétes gondolatra épülnek az *extrapolációs* módszerek, melyek a katasztrófaelmélet mechanikai alkalmazásában gyönyörű diszciplínává fejlődtek, és olyan szerkezetek esetén játszanak szerepet, melyek tönkremenetelében a szilárdság alárendelt jelentőségű. Szintén egy erősen leegyszerűsített – geometriai hibákat elhanyagoló – ún. ideális modellből indulnak ki, és a hibák iránti érzékenység alapján állítanak fel viselkedési típusokat.

A módszer közismertsége miatt további részletezés talán nem szükséges. A besorolás elvi jellegű, a paraméterek megadása kísérleti vagy numerikus úton történik. Természetesen a módszer erősen *a rugalmas állapothoz kötött*.

A modell és valóság kapcsolatának elemzése során még egy szempontra térnék ki: ez a

mechanikából átvett módszerekre — ha úgy tetszik, modell-elemekre — vonatkozik.

Ilyen a statika elkülönülése a mechanika általános diszciplináján belül.

A merev testre ható erők egyensúlyi konfigurációinak felkeresése során a mechanika egyes alapfogalmaira — sebesség, gyorsulás, tömeg, idő — szükség nincs.

Ha e módszereket átvisszük a szilárd (mondjuk, rugalmas-képlékeny) anyagú deformálható testekre, kompromisszumra van szükség, hiszen ezek a teherfelhordás folyamatában mozgást — deformációs mozgást — végeznek. Az áthidalást a végtelen lassan és fokozatosan növekvő ún. *statikus terhek* fikciója (modellje) jelenti, ahol is éppen a lassúság — a kicsiny gyorsulás — feltételezése megengedi, hogy a deformálható testet visszahelyezzük a statika sebességtől és gyorsulástól mentes világába. Ez bizonyos elvi nehézségekre is vezet, hiszen például az energiamegmaradás tétele — mozgási energia fogalma nélkül — csak a kiegészítő munka nehezen definiálható (és magyarázható) pótlékának bevezetésével értelmezhető.

Ennek a sokszor természetesnek vett eljárásnak veszélyei vannak. Elsősorban azért, mert laboratóriumi kísérletek megtervezésénél — ahogy Kármán kísérleteinél is hivatkoztunk rá — automatikusan az elméleti feltevéseket igyekszünk betartani — például a teherfelvitel eszközeiben és ütemében, vagy a szélteher

okozta feszültségkimutatás során — ezáltal a valóság egy *lényeges* elemét kirekesztve.

Még ott is, ahol e megoldás visszásságai a terhek közismerten dinamikus jellege miatt nyilvánvalók, gondolatainkat a statikai gondolkodás Prokrusztész-ágyába kényszerítjük olyan, egzaktul nehezen megfogalmazható tényezőkkel, mint például a dinamikus tényező. Az erre vonatkozó (pl. Erzsébet-hídi és más) mérések e tényező eredendően durva, és *kísérletileg csak jókora erőszakolás árán meghatározható voltát igazolják.*

A szél statikus teherré való szelídítése is egész sor tényezőt követel, ami végül is — mint pl. a Nyugati pu. szerkezetével végzett szélcsatorna kísérletek sejtetik — előjel-tévedésekre is vezethet és arra utal, hogy a statikus teher fogalma, egyáltalán *a teher és szerkezet különválasztása* — hibák forrása.

Ugyanígy a szerkezeteink viselkedésének tanulmányozására leginkább használt jelleggörbe, az ún. *erő-elmozdulás diagram sem egy valóságos mozgás* trajektóriája, hanem egyensúlyi állapotok egymásutánja: a statika *időmentes* világában bejárt „egyensúlyi út”. Ennek realitása, valóságtartalma mindig ellenőrzésre szorul olyan értelemben, hogy a valóságos világban létező szerkezet nem tér-e le erről a fiktív útról azáltal, hogy valóságos mozgásba kezd (mint pl. a Tacoma-híd).

Noha ez az ellenőrzés — melyet stabilitás-vizsgálatnak nevezünk — a legtöbb gyakorlati

esetben a statika saját eszköztárával végrehajtható, ismertek olyan esetek, ahol a statikai modell félrevezető lehet.

És – a teljesség kedvéért – egy utolsó utalás vizsgálataink egyik fő eszközére: a deformálható test kontinuummal történő modellezésére. Ez elsősorban itt most nem tárgyalt jelenségekre, fáradásra, rideg törésre vonatkozik, melyek pedig a vázolt problémakörben legalább említést érdemelnek, és jelentőségük illusztrálására egy súlyos forgalmat lebonyolító pesti felüljáró pályaszerkezetének valószínűleg évek óta növekvő, frissen fényképezett repedését mutatom be, melynek további sorsát megbecsülni alapvető érdek volna. Úgy tűnik, hogy az e kérdéssel foglalkozó diszciplína, a törésmechanika kezében a kontinuummodell legalábbis kiegészítésre szorul, hogy ez erősen lokális jelenségek tárgyalását megbízhatóbbá tegye. E témakör további boncolgatása azonban az előadás tervezett kereteit meghaladja.

Ha az elmondottakat néhány mondattal kellene összegezni, azt mondanám, hogy a tartószerkezetek elméletében a részletes ismeretek és az ezeket összefoglaló modellek széles skálája jött létre.

Ezek *bizonyos jelenségeket* híven leírnak, más esetben, például éppen *a gazdaságosság érdekében rafináltan* megtervezett szerkezet – legyen szabad ezek közül néhányat kommentár nélkül bemutatni –, szóval ezek *bo-*

nyolult tönkrementeli formáinak leírásában — hézagmentes egészzé nem álltak össze. Emiatt az elmélet és a közvetlen tapasztalatokat közvetítő hagyomány a *tervezésben együtt* van jelen; ezt tükrözik a szakma kódexei: a tervezési szabványok is azzal, hogy vegyesen tartalmaznak tudományosan alátámasztott és a gyakorlati szakemberek szavazatával szentesített előírásokat. Egyre nélkülözhetetlenebbé válik a számítási modell — pontosabban modellsorozat — jóságának rendszeres kísérleti verifikálása; a kísérleti technika olyan fejlesztése, mely le tudja vetni beidegződött gondolkodásmódunk béklyóit. További feladatainkat ennek tudatában kell megtervezni.

Végül még néhány köszönetnyilvánításra szeretnék sort keríteni. A tárgyalást Kherndl professzornak — tanszékünk első vezetőjének — gondolataival vezettem be: legyen most szabad befejezésül tanszékünk kutatógárdája ma is igen eredményesen tevékenykedő tagjainak, köztük is elsősorban Platthy Pál, Iványi Miklós professzornak, Szatmári István docensnek, Szittner Antal főmunkatársnak köszönetet mondani, többek között azért, hogy előadásomban munkáikra, kísérleteikre hivatkozhattam.

A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó és Nyomda főigazgatója

Felelős szerkesztő: Nagy Tibor

A tipográfia és a kötésterv Löblin Judit munkája

Műszaki szerkesztő: Kiss Zsuzsa

Terjedelem: 1,58 (A/5) ív

HU ISSN 0236-6258

16582 Akadémiai Kiadó és Nyomda

Felelős vezető: Hazai György



